

**Пятый Международный Информационный Форум по  
аналитическим методам и компьютерным кодам оценки безопасности атомных станций с  
реакторами типа ВВЭР и РБМК**

**Исследования взаимосвязанных процессов механики и теплогидравлики кладки РБМК**

*Парафило Л.М., Крючков Д.В. (ГНЦ РФ – ФЭИ),  
Габараев Б.А., Соловьев С.Л., Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. (НИКИЭТ)*

**1. Проблема кладки. Коды, обеспечивающие анализ проблемы.**

Значительная часть проблем безопасности реакторных установок РБМК связана с текущим состоянием графитовой кладки, эксплуатационными и аварийными процессами, которые могут происходить в ней. Кладка реактора (рис 1.), представляющая собой многоэлементную конструкцию, образованную 2887 графитовыми колоннами (34832 графитовых блока), пронизанную 2052 процессорными трубами 3-х различных типов в течении проектного срока эксплуатации, подвергается радиационному и термохимическому воздействию, в результате которого в ней происходят существенные изменения. Опыт эксплуатации показал возможность возникновения микротечей в процессорных трубах, приводящих к поступлению водяной среды в реакторное пространство, а также возможность разрыва труб ТК (технологических каналов) прежде всего в следствие аварийно развивающегося дефицита расхода теплоносителя с истечением теплоносителя в кладку с большим расходом. В этом последнем случае наблюдается разрушение графитовых блоков, аварийной колонны и значительные остаточные смещения графитовых блоков в окрестности места аварии. Авария сопровождается разрушением барьеров удержания радиоактивных продуктов деления (1-ой барьер – оболочки твэлов, 2-ой – труба ТК) повышением давления в реакторном пространстве и развитию подъемных усилий, действующих на верхнюю плиту, а также повышенным силовым нагрузкам на кожух реактора, в связи с чем может быть связана возможность разрушения 3-его, последнего удерживающего барьера – герметизирующих конструкций реакторного пространства.

Аварийные процессы с истечением теплоносителя в кладку характеризуются одновременным протеканием сложных взаимозависимых процессов:

- механико-структурных (разрушение трубы аварийного ТК, разрушение графитовых блоков, перемещение графитовых блоков, прогибы реакторных труб, сложное напряженно деформирование материала труб),
- тепло-гидравлических (течение и теплообмен в аварийном ТК, течение в реакторном пространстве с модифицируемой геометрией теплоносителя с меняющимся составом и энергией: азотно-гелиевая смесь  $\Rightarrow$  +2-х фазный водяной теплоноситель, с примесью водорода  $\Rightarrow$  перегретый водяной пар)
- адсорбционных и термохимических (удержание радиоактивных продуктов деления графитовой кладки, генерация водорода).

Первая попытка комплексного подхода была реализована кодом R\_SPACE [Analysis of Multiple Pressure Tube Ruptures for RBMK/ O.Novoselskyi, V.Filinov, G.Tsiklauri, L.Parafilo, V.Korolev// Transac. of the International Information Exchange Forum on Analytical Methods and Computational

Tools for NPP Safety Assessment, Obninsk (Russia), 8-12 September, 1997.- Washington (USA), 1997.- V.II.- P.520-561.]. Применение кода выявило ряд характерных особенностей, присущих кладке. Критический анализ существующих конструкций реакторных установок моделей кода R\_SPACE и получаемых результатов, определили нарастание требований о необходимости совершенствования кода R\_SPACE. В результате, был создан код U\_STACK = UNITED STACK (объединенное рассмотрение процессов в кладке и всей совокупности систем, связанных с ней). В таблице 1 представлен сопоставительный анализ кодов.

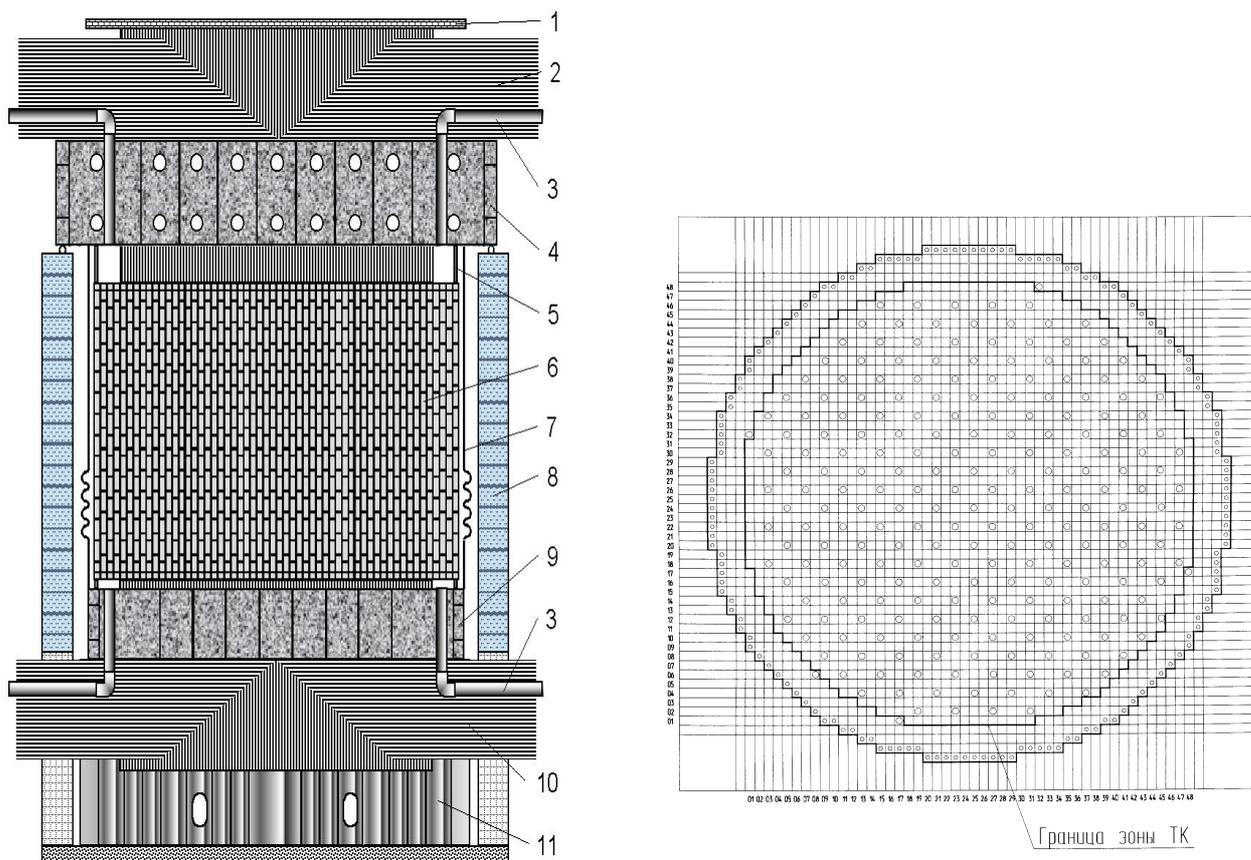
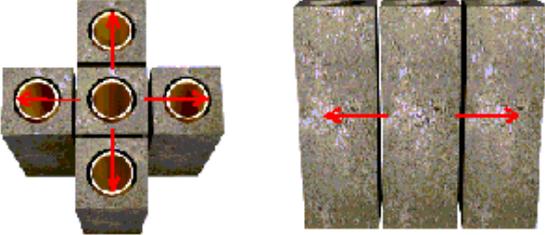
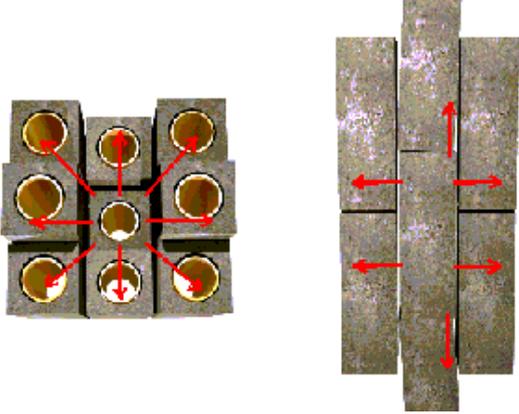


Рис. 1. 1- плитный настил; 2- пароводяные коммуникации; 3- трубопроводы СЗРП; 4- верхняя металлоконструкция; 5- каналы охлаждения отражателя; 6- графитовая кладка; 7- кожух; 8- боковая биологическая защита; 9- нижняя металлоконструкция; 10- нижние водяные коммуникации; 11- опорная металлоконструкция

Таблица 1. Сравнительный анализ кодов R\_SPACE и U\_STACK

Код прототип R_SPACE	Код нового поколения U_STACK	
Не учитываются относительное вертикальное смещение супротивных пар соседних колонн по высоте	Учитываются реальные смещения супротивных блоков смежных колонн по высоте	 <p data-bbox="1190 528 1517 595">Регулярная нижняя группа блоков кладки</p>
Рассматриваются только 2 степени свободы поступательного перемещения графитовых блоков в направлении горизонтальных осей X и Y.	Наряду с поступательными, рассматриваются степени свободы вращения блоков относительно осей X и Y.	
Силовое взаимодействие каждого графитового блока ограничено взаимодействием только с ближайшими соседями	Учитывается взаимодействие с 18 соседними блоками.	
		
Модель равновесного гомогенного течения	Двухжидкостная неравновесная модель многокомпонентной среды	
Раздельное решение проблем течения и теплообмена среды и температурного режима графита	Интегрированное решение проблем течения и теплообмена среды и температурного режима графита	
Задаются функции течи – график расхода и энтальпии втекающего в кладку потока	Полностью формализованный процедурно реализованный сценарий, для которого задаваемыми являются только координаты аварийного ТК и исходное событие аварии (например, блокирование проходного сечения подводящего тракта)	
	Обеспечен учет транспорта через кладку фрагментов разрушенных графитовых блоков и топлива	

В составе основного тепло-гидравлического раздела кода U\_STACK используются процедуры кода RELAP5/MOD3.2

- для описания процессов в области кладки, примыкающей к аварийному технологическому каналу (~ 60 колонн)
- для моделирования процессов в тракте 1-го контура в тракте ТК
- для моделирования процессов в системе СЛА

Таким образом, в составе кода U\_STACK содержится 3 главных компонента, отображающих физические процессы:

#### МЕХАНИКА + RELAP + ГОМОГЕННАЯ МОДЕЛЬ

Гомогенная модель используется для решения задач течения и теплообмена в удаленной от места разрыва области кладки.

Кроме того, в состав кода входит развитый графический интерфейс, внутренний интерфейс, поддерживающий обмен между разделами кода

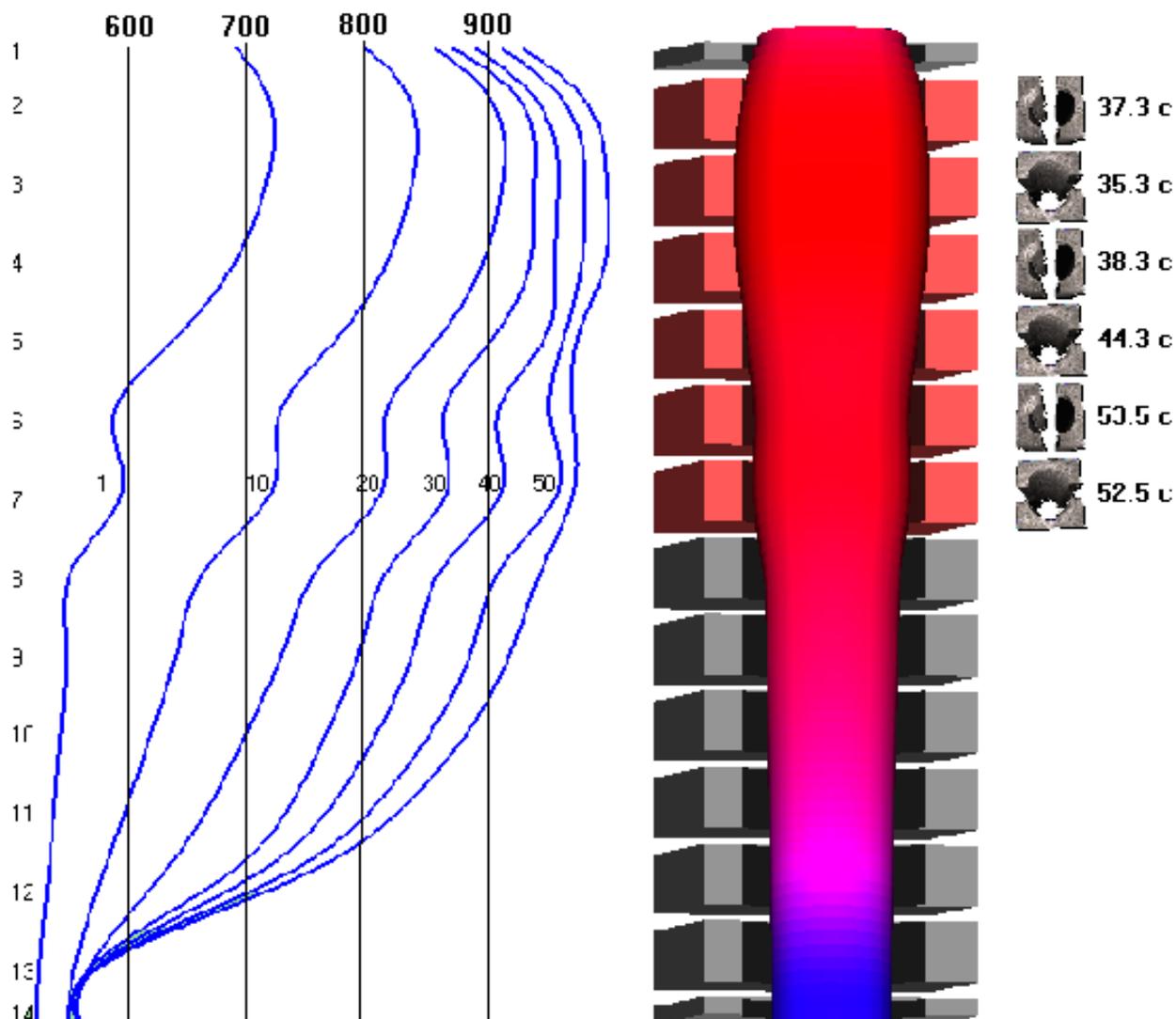
а) МЕХАНИКА  $\Leftrightarrow$  RELAP

б) RELAP  $\Leftrightarrow$  ГОМОГЕННАЯ МОДЕЛЬ

Интерфейсные процедуры (а) обеспечивают передачу изменяющихся определяющих геометрических параметров (длин участков объемов, гидравлических диаметров, площадей проходных сечений) из раздела МЕХАНИКА в раздел RELAP и возврат значений давления, газового состава, температуры графитовых блоков.

## 2. Стадия аварии до момента разгерметизации трубы ТК.

В случае несоответствия энерговыделения и расхода в ТК (повышенная мощность или пониженный расход) параметры среды в канале могут повышаться по сравнению с номинальным уровнем. Возникает кризис теплоотдачи, переход значительной части теплоотдающей поверхности твэлов в режим закризисной теплоотдачи, перегрев пара. Повышение температуры оболочек топливных элементов повышается, развивается парциркуляционная реакция с выделением дополнительного тепла, лучистый поток энергии от твэлов беспрепятственно достигает стенки трубы ТК. Такой сценарий может быть реализован в результате блокирования входного тракта ТК. Такая авария на блоке №3 Ленинградской АЭС в 1991 г., исходным событием которого было блокирование входного тракта ТК оторвавшимся элементом ЗРК, рассматривается ниже в качестве результата приложения кода U\_STACK. От момента отрыва клапана до разгерметизации тракта трубы, согласно данным системы регистрации параметров энергоблока прошло не более 60 сек. На рис. 2. представлены результаты оценки температуры стенки трубы и последовательности разрушения графитовых блоков аварийной колонны под действием деформируемой трубы. Разрыв блоков произошел от 37 сек до 56 сек. с момента исходного события. Перемещение фрагментов блока под действием расширяющейся трубы к моменту разрыва трубы привело к смещению колонн, соседних с аварийной, на величину ~ 15 мм от равновесного положения. Фронт перемещаемых блоков имел высоту 3.6 м, в окрестности перемещаемых колонн образовались уплотнения и пустоты в диагональном направлении, таким образом, к первой минуте аварии, кладка оказалась существенным образом деформированной. Причем, выше и ниже группы аварийных блоков, зазоры между аварийной колонной и соседними колоннами возросли с уровня ~1 мм до уровня ~5мм.



**Рис 2** Динамика температуры трубы ТК. Последовательность разрыва блоков под воздействием деформирующейся трубы.

1,2,3, ... - номера графитовых блоков.

600,700, ... - температура трубы, К.

1,10,20, ...- моменты времени, для которых представлено распределение температуры по высоте.

35.3 с, 37.3 с, ... - моменты времени разрыва блоков.

### 3. Разрыв трубы. Параметры истечения.

Рассматривается мгновенная (за время 0.001 сек) разгерметизация трубы на уровне 4 блока кладки при отсчете сверху с образованием вертикального продольного отверстия с площадью  $0.001 \text{ м}^2$ , длиной 0.6 м. В первый момент в разрыв поступает теплоноситель высоких параметров (перегретый пар с температурой  $\sim 1800 \text{ К}$ , давление  $\sim 7 \text{ МПа}$ ). Быстрое падение давления приводит к вскипанию теплоносителя в подводящем тракте и нижней части ТК, повышенной скорости транспорта водяной фазы в направлении отверстия разгерметизации с соответствующим снижением энтальпии. С противоположной стороны через подъемный тракт поступает теплоноситель с энтальпией, приближающейся к уровню энтальпии воды в барабане-сепараторе. Основной расход как для верхней, так и для нижней половин отверстия обеспечивается поступлением сверху со стороны барабана-сепаратора. Относительно небольшой расход, проходящий через топливные сборки в нижней части ТК, обуславливает повышенный уровень энтальпии потока теплоносителя истекающего через нижнюю половину отверстия разгерметизации. Относительная стабилизация параметров истечения наступает через  $\sim 3.5$  сек с момента разрыва (рис. 3 и 4).

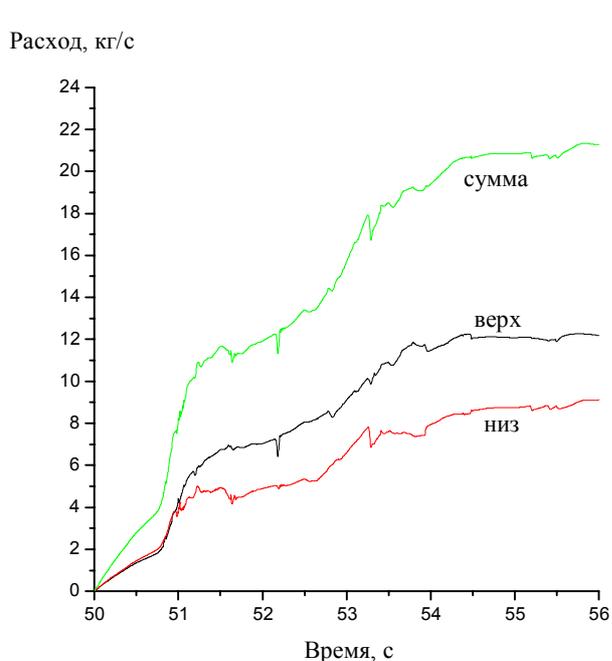


Рис. 3. Динамика расхода после разрыва трубы ТК, верх (низ) - верхняя (нижняя) половина отверстия.

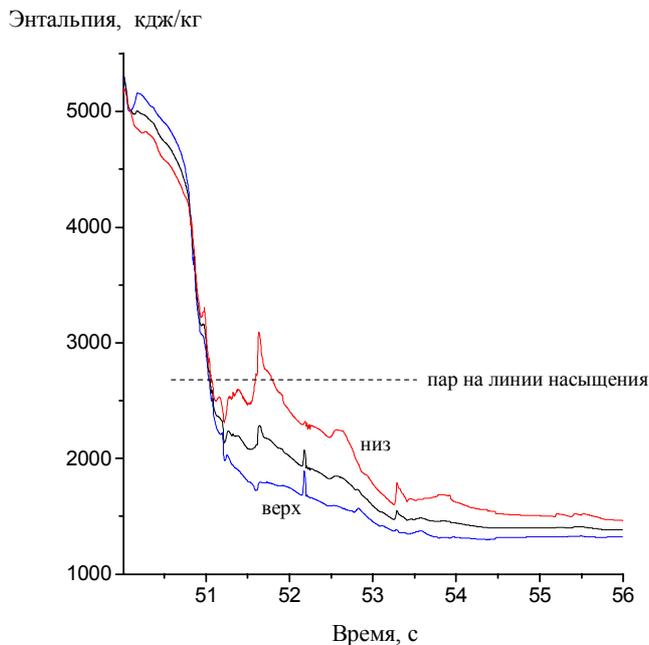
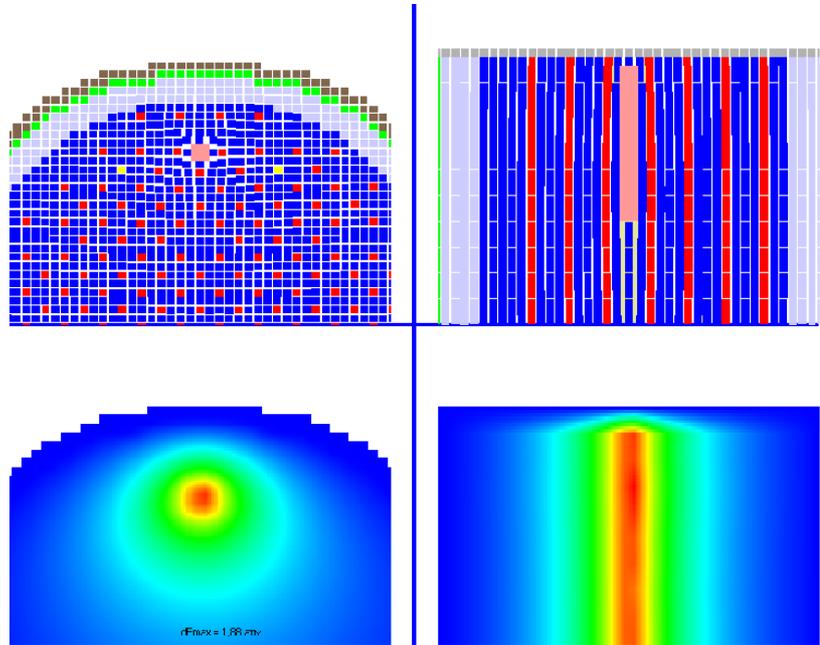


Рис. 4. Динамика энтальпии потоков теплоносителя, истекающих в разрыв трубы ТК: верх(низ) - верхняя (нижняя) половина отверстия разрыв указано также среднее значение энтальпии.

#### 4. Распространение давления и перемещение кладки. Теплообмен.

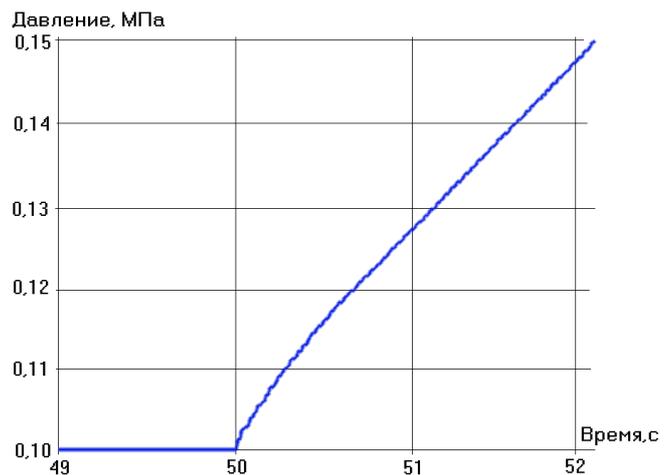
Период установления квазистационарного состояния кладки и распределение параметров протекающей в ней среды происходит через  $\sim 10$  сек после разрыва. На рис. 5. представлены виды кладки и распределение давления в горизонтальном и вертикальном сечении, проходящем через центр разрыва трубы ТК.

Деформирование кладки характеризуется прогибами колонн и проходящих через них труб ТК. При этом трубы ТК подвергаются воздействию сосредоточенных усилий на границах горизонтальных стыков соседних в вертикальном направлении графитовых блоков. Максимальное значение прогиба достигается ниже уровня центра разрыва на величину  $\sim 1$  м. Наличие контрукционных смещений соседних графитовых блоков при их смещении, обуславливает образование вертикальных каналов увеличенных размеров в направлениях диагональных осей, проходящих через центр аварийного ТК. Вследствие взаимодействия соседних блоков в направлении главных диагоналей, пара зазоров взаимодействующих блоков уплотняется, уменьшается до минимального уровня, а другая соответственно возрастает, в результате формируется система вертикальных каналов с малым гидравлическим сопротивлением и одновременно с большим сопротивлением в горизонтальном направлении. При перемещении элементов в такой системе локальные горизонтальные связи могут изменяться. Течение кипящего потока происходит в непрерывно изменяющейся системе параллельных ветвящихся в направлении движения потока зазоров, которые обеспечивают гидравлическую связь области разрыва с относительно невозмущенной удаленной областью реакторного пространства, в связи с чем можно ожидать проявление неустойчивости, и даже автоколебаний (Рис. 6.).



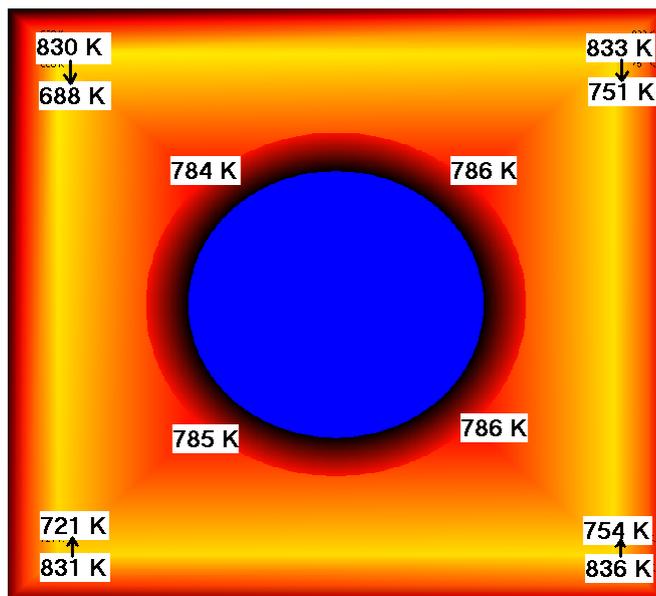
**Рис. 5. Вид сечения кладки и поля давления на момент 6 с.**

Рис. 6. Динамика максимального давления в кладке в зазоре между аварийной и соседней колоннами



**Рис. 6. Динамика максимального давления в кладке в зазоре между аварийной и соседней колоннами**

Теплообмен характеризуется в аварийной области высоким уровнем неравномерности. (температура графита ~800 К, температура протекающей среды может достигать уровня 373 К) Высокая скорость протекающей среды, близкая к скорости звука, обеспечивает достаточно интенсивный теплообмен, приводящий к существенному охлаждению тонких наружных слоев графитовых блоков при сохранении высокого уровня температуры во внутренних областях блоков. (Рис. 7.).



**Рис. 7. Температура графитового блока, соседнего с аварийным**

### Заключение

Код нового поколения U\_STACK обеспечивает по сравнению с кодом R\_SPACE существенный прогресс в учете реальных особенностей конструкций реактора. Использование кода улучшенной аппроксимации RELAP5/MOD3.2 в качестве инструмента для анализа тепло-гидравлических процессов в кладке и контуре, позволяет утверждать, что отображение процессов в кладке также окажется более близким к реальности. Формализация сценария с помощью системы развитых вычислительных процедур обеспечивает сокращение числа произвольно задаваемых исследователем параметров, существенным образом сокращая число рассматриваемых вариантов развития аварий. Можно надеяться, что использование кода U\_STACK обеспечит надлежащий уровень анализа безопасности установок РБМК и возможность отработки мер по повышению уровня безопасности.